

## О МИНИМУМЕ НАПРЯЖЕНИЯ НАЧАЛА ИОНИЗАЦИИ В ГАЗОВОМ ВКЛЮЧЕНИИ

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной и кабельной  
техники)

Обеспечение долговечной работы электрической изоляции является важной научной и практической задачей. Рядом авторов [1, 2, 3] показано, что разрушение изоляции происходит в результате ионизации в газовых включениях. В связи с указанным были получены практические формулы, связывающие время жизни изоляции с напряжением начала ионизации. Одна из таких формул предложена Делекторским [4]

$$t = \frac{\kappa}{fU^2 \left(1 - \frac{U_n}{U}\right)}. \quad (1)$$

Как видно из приведенной формулы время жизни изоляции будет тем больше, чем выше  $U_n$ . Напряжение начала ионизации в газовом включении является косвенной мерой, оценивающей размеры поры в электрической изоляции. При этом естественно принимается, что чем больше пора, тем меньше напряжение начала ионизации и меньше время жизни изоляции. Задачей настоящей работы является установление связи между размерами поры и напряжением начала ионизации.

В литературе [1] показано, что пробивное напряжение в газовом включении приблизительно равно пробивному напряжению газа между металлическими электродами при равенстве расстояний между электродами и толщины газовых включений.

Тогда, принимая, что в газовом включении поле равномерно, пробивное напряжение газа найдется [5].

$$U_{пр.г} = \frac{B\rho x}{A\rho x \ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right)}, \quad (2)$$

где  $x$  — толщина газовой поры в направлении электрического поля.

Приложенное к изоляции напряжение до пробоя газового включения найдется.

$$U = U_r + U_t. \quad (3)$$

В этом случае  $U_r$  и  $U_t$  — падение напряжения, приходящееся на газо-



вое включение и на твердый диэлектрик соответственно. Пробой газового включения произойдет тогда, когда  $U_r = U_{пр.г.}$ . Рассмотрим, как будет изменяться напряжение начала ионизации от величины газового включения.

а) Равномерное поле.

На границе раздела двух диэлектрических сред напряженность поля меняется скачкообразно

$$E_r = \xi E_t. \quad (4)$$

Очевидно, для условий равномерного поля

$$\begin{aligned} U_r &= E_r x, \\ U_t &= E_t (l - x), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $l$  — расстояние между электродами;

$x$  — толщина воздушного включения.

Используя выражения (2), (3), (4), (5), найдем напряжение появления разряда в газовом включении

$$U_n = \frac{Bp}{Apx} \left( x - \frac{x}{\xi} + \frac{l}{\xi} \right) \cdot \ln \frac{1}{\frac{1}{\gamma} + 1}. \quad (6)$$

Функция уравнения (6) имеет минимум, который можно найти, взяв первую производную по  $x$  и приравняв ее нулю

$$\frac{dU_n}{dx} = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (6) дает

$$\frac{l}{\xi - 1} = x_n \left[ \ln \frac{Apx_n}{\ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right)} - 1 \right], \quad (8)$$

где  $x_n$  — толщина включения, соответствующая минимуму напряжения начала ионизации.

На рис. 1 показана зависимость  $x_n$  от толщины при различной диэлектрической проницаемости диэлектрика при условии  $\gamma = 4$ ,  $A = 17,5$  1/см.мм Hg  $p = 760$  мм Hg [4]. Как видно из рис. 1 и формулы (8), размер поры, соответствующий минимальному значению напряжения начала ионизации, увеличивается с уменьшением  $\xi$  и с увеличением толщины изоляции.

На рис. 2 показаны зависимости напряжения начала ионизации от размера газовых включений при толщине изоляции  $l = 1$  см,  $\xi = 3$  и  $B = 87$ , 2 в/см. мм Hg.

Из рис. 2 видно, что напряжение начала ионизации может иметь одну и ту же величину при двух значениях размеров газового включения. При больших размерах газового включения износ изоляции будет интенсивнее, так как после пробоя газового включения в твердом диэлектрике создается большая напряженность поля. Так при  $U_n = 1,5$  кВ при размере газового включения 0,009 см  $E_t = 1,5$  кВ/см, а при  $x = 0,3$  см,  $E_t = 2,14$  кВ/см.

б) Поле цилиндрического конденсатора.

Цилиндрический конденсатор представляет собой поле довольно часто встречающееся в электроизоляционных конструкциях. Предположим, что газовое включение будет располагаться у электрода меньшего



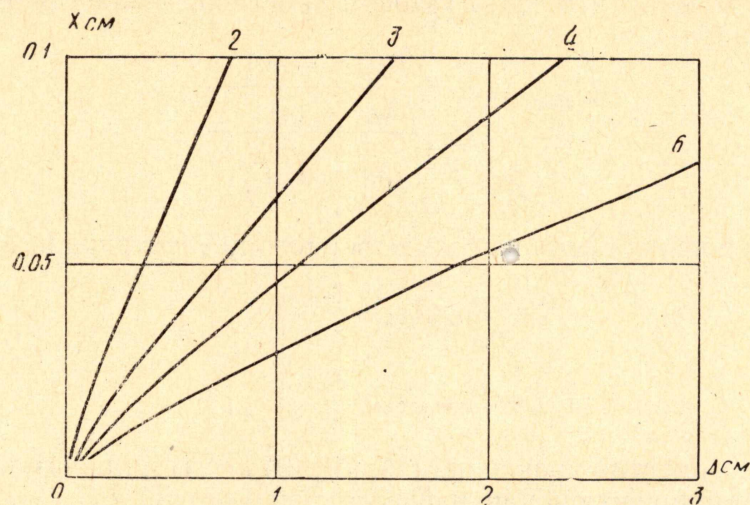


Рис. 1. Зависимость толщины газового включения, соответствующей минимуму напряжения начала ионизации, от толщины диэлектрика в условиях равномерного поля при различной диэлектрической проницаемости диэлектриков. Цифры у кривых показывают диэлектрическую проницаемость твердого диэлектрика

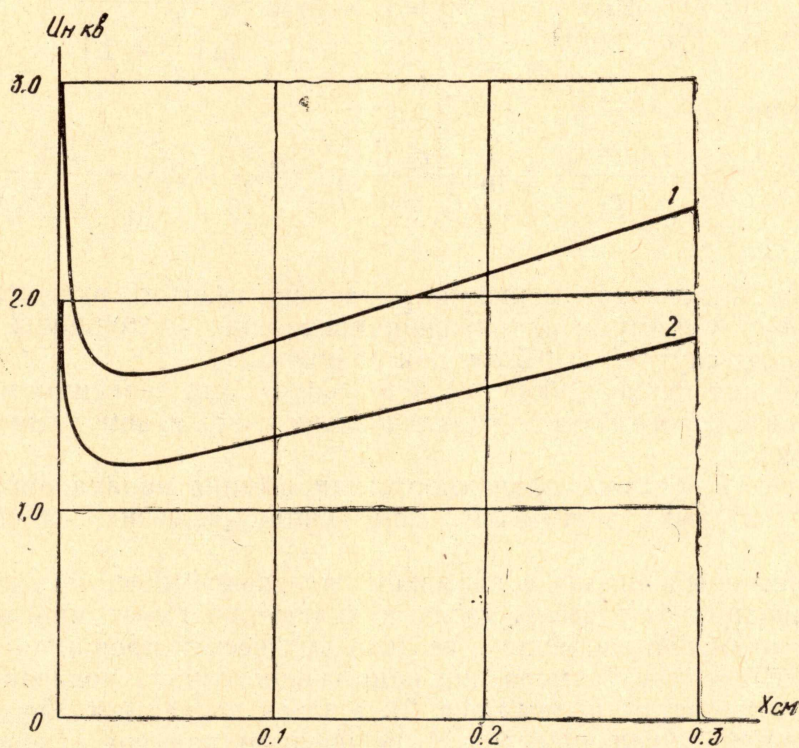


Рис. 2. Зависимость напряжения начала ионизации от толщины газового включения для равномерного (1) и неравномерного (2) полей



радиуса. Принимая, что поле в газовом включении является однородным, можно записать

$$U_{\text{пр.г.}} = \frac{Bp(r_2 - r_1)}{\ln \frac{Ap(r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)}} \quad (2a)$$

Падение напряжения на слоях твердого диэлектрика и газа найдется

$$\left. \begin{aligned} U_r &= E_{r \text{ макс}} r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \\ U_t &= E_{t \text{ макс}} r_2 \ln \frac{r_3}{r_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Решая совместно уравнения (3), (4), (9) и (2a) и принимая, что ионизация в газовом включении начнется при условии  $E_{r \text{ макс}} = E_{\text{пр.г.}}$ , найдем напряжение начала ионизации

$$U_n = \frac{Bpr_1}{\ln \frac{Ap(r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)}} \left( \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\xi} \ln \frac{r_3}{r_2} \right) \quad (10)$$

Условия минимального значения  $U_n$  найдется при решении уравнения (7). В результате решения получим

$$\frac{r_2}{r_2 - r_1} \left( \xi \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_3}{r_2} \right) = (\xi - 1) \ln \frac{Ap(r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)} \quad (11)$$

или полагая  $r_2 - r_1 = x$ ,

$$\frac{r_1 + x_p}{x_p} \left( \xi \ln \frac{r_1 + x_p}{r_1} + \ln \frac{r_3}{r_1 + x_p} \right) = (\xi - 1) \ln \frac{Ap x_p}{\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)} \quad (11a)$$

На рис. 3 показана зависимость размера газового включения, соответствующая минимуму напряжения ионизации, от толщины изоляции  $\Delta = r_3 - r_1$  для случая  $r_1 = 0,5$  см, при различных  $\xi$ .

Сравнивая между собой рис. 1 и 3 видим, что зависимость  $x = f(\Delta)$  для неравномерного поля идет значительно выше, чем в случае равномерного поля.

На рис. 2 показана зависимость напряжения начала ионизации от размера газовых включений для цилиндрических образцов при  $\xi = 3$ .

Проведенный анализ показывает, что зависимость напряжения начала ионизации от размера газовых включений имеет минимум, зависящий от размеров изоляции и ее диэлектрической проницаемости. При этом с увеличением размера пор напряжение начала ионизации уменьшается (левая ветвь кривых рис. 2), а затем возрастает. Учитывая, что износ изоляции увеличивается с увеличением размера газового включения, следует ожидать при малых газовых включениях ускоренного износа изоляции при уменьшении  $U_n$ , а при больших газовых включениях ускоренного износа изоляции при увеличении  $U_n$ . Очевидно, что формула (1) будет справедлива только при небольших размерах газового включения в изоляции.



Показано, что напряжение начала ионизации не может однозначно определять долговечность изоляции и его следует обязательно дополнять другими методами.

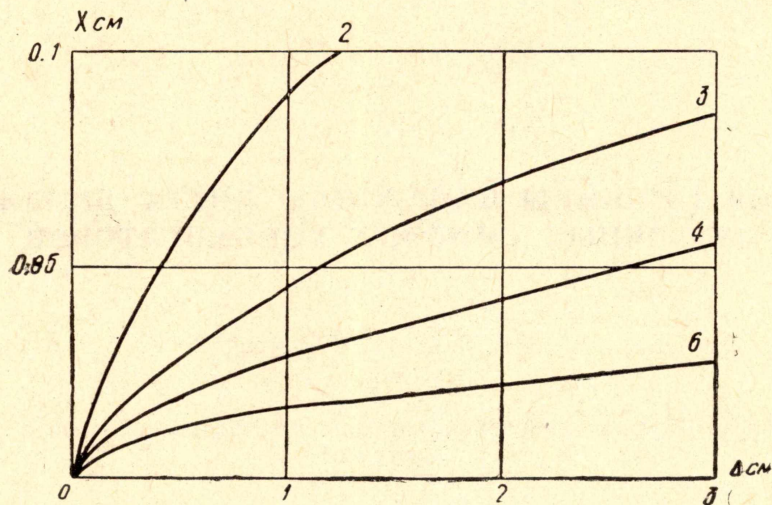


Рис. 3. Зависимость толщины газового включения, соответствующей минимуму напряжения начала ионизации, от толщины диэлектрика в условиях неравномерного поля при различной диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика. Цифры у кривых показывают диэлектрическую проницаемость твердого диэлектрика

#### ЛИТЕРАТУРА

1. I. Mason. The deterioration and breakdown of dielectrics Resulting from internal discharges. Proc. IEE part 1, vol. 98, № 109, 1951.
2. Дж. Б. Беркс и Дж. Г. Шульман. Прогресс в области диэлектриков, т. 1, Госэнергоиздат, 1962.
3. А. Н. Перфилов. Электрическая прочность кабельного полиэтилена и кабелей с полиэтиленовой изоляцией, в сб. «Пробой диэлектриков и полупроводников», изд. «Энергия», 1964.
4. Г.П. Делекторский. Некоторые закономерности пробоя полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей. Электричество, № 11, 1961.
5. Дж. Мин, Дж. Крегс. Электрический пробой в газах. Изд. ИЛ., 1960.